

05.13.06
Б 246

КОНТРОЛЬНАЯ
ЭКСПЕРТИЗА

На правах рукописи

Барбасова

Барбасова Татьяна Александровна

**АВТОМАТИЗАЦИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ ПАРОВОДЯНОГО
СТРУЙНОГО ПОДОГРЕВАТЕЛЯ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (промышленность)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск
2004

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Пароводяные струйные подогреватели (ПСП) в настоящее время используются в теплофикационных системах в связи с развитием энергосберегающих работ. ПСП с успехом заменяют традиционные теплообменники, при этом они дешевле и проще в эксплуатации. Они используются для теплоснабжения цехов и горячего водоснабжения жилого фонда.

Преимущества применения ПСП в сравнении с традиционными теплообменниками следующие.

1. Экономия пространства

ПСП является смесительным теплообменником, в котором отсутствуют промежуточные теплообменные поверхности и тепло передается при непосредственном контакте пара и воды. Поэтому он обладает более высоким коэффициентом теплопередачи и имеет меньшие размеры. За счет этого обзаводится экономия пространства при строительных и монтажных работах.

2. Уменьшение расхода пара

В ПСП принципиально исключено явление пролетного пара, характерное для поверхностных подогревателей. Более того, тепло, содержащееся в паре, используется в ПСП на 100%.

3. Сокращение потерь тепла

Благодаря малым габаритам ПСП можно существенно уменьшить потери тепла с наружной поверхности подогревателя и тем самым увеличить тепловой КПД.

4. Высокая надежность

В конструкции аппарата нет тонкостенных трубок.

5. Высокая ремонтпригодность

ПСП имеет малое число сменных деталей, причем любая из них может быть достаточно просто изготовлена.

6. Простота технического обслуживания

Ввиду отсутствия в ПСП теплообменной поверхности, отсутствует необходимость химической промывки трубного пучка от накипных отложений.

7. Простота эксплуатации

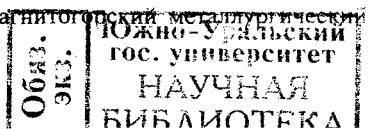
ПСП запускается не сложнее, чем традиционный теплообменник, при этом мало инерционен и быстро выходит на рабочий режим.

8. Возможность утилизировать отработанный пар

В ПСП исключается сброс отработанного пара в атмосферу, тем самым улучшаются экологические показатели.

Данные положительные свойства ПСП обуславливают то, что внедрение их в теплофикационные системы является одним из рекомендуемых мероприятий, выполняемых в рамках программ энергосбережения, как на региональном, так и федеральном уровнях.

Однако прямое преобразование пара в воду обладает также рядом существенных недостатков. Опытное применение ПСП в системе теплофикации на промышленной площадке ОАО "ММК" (Магнитогорский металлургический



комбинат) показали, что режимы работы их неустойчивы. При изменении параметров пара возникают возмущающие воздействия, гидравлические удары, которые могут нарушить работу системы.

Из сказанного следует, что задача автоматизации регулирования режимов ПСП является актуальной. Данная задача является нетривиальной, так как динамика процессов регулирования происходит в двухфазной среде пар-вода, где возможны автоколебания, ударные волны и другие условия, затрудняющих управление режимами. Процессы, протекающие в ПСП, являются недостаточно изученными и требуют проведения специальных исследований.

В этих условиях возникает важная научно-техническая задача автоматизации управления режимов ПСП. Исследованием режимов струйных аппаратов, занимались достаточно давно зарубежные и отечественные авторы: Ренкин М, Цейнер Г, Фисенко В.В., Соколов Е.Я., Зингер Н.М., Дейч М.Е., Филиппов Г.А. и др. Вопросы автоматики освещены в работах А.И. Белевича, А.В. Крушцева, В.А. Малафеева и др. Однако в этих работах не исследована динамика режимов регулирования, известные примеры использования автоматики носят чисто аппаратурный характер для узкого класса паровых инжекторов, детальное исследование динамики процессов регулирования не проводилось.

Рассматриваемая задача в литературе не освещена, что и определяет актуальность данной работы.

Цель диссертационной работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является автоматизация регулирования режимов ПСП. Для достижения указанной цели решались следующие задачи исследовательского, методического и прикладного характера.

1. Разработка имитационной модели процесса регулирования режимов ПСП на основе экспериментальных и теоретических исследований.
2. Разработка методики оптимизации параметров ПСП на основе имитационных и натуральных экспериментов.
3. Разработка способов автоматического регулирования режимов ПСП.
4. Внедрение разработанной автоматической системы регулирования режимов ПСП на опытной промышленной установке в теплофикационной системе ОАО "ММК", г. Магнитогорск.

Связь диссертации с федеральными и региональными программами. Диссертационное исследование выполнялось в соответствии с "Законом Российской Федерации об энергосбережении №28-ФЗ от 03.04.96", "Законом Челябинской области об энергосбережении и повышении эффективности использования топливно-энергетических ресурсов Челябинской области №12-ОЗ от 02.02.96", в рамках федеральной целевой Программы "Энергосбережение России на 1998-2005 годы" (утверждена постановлением правительства Российской Федерации №80 от 24.01.98), "Программы энергосбережения Челябинской области до 2005 года" (утверждена постановлением Губернатора Челябинской области №582 от 11.12.98).

Объект исследования: Система автоматического регулирования ПСП теплофикационных систем.

Предмет исследования: Динамика процессов и вопросы автоматизации регулирования режимов ПСП теплофикационных систем.

Методология и методика исследования. Теоретической и методологической основой исследования служили труды отечественных и зарубежных ученых по автоматизации систем теплоснабжения и струйным аппаратам.

В работе использовались методы теории автоматического регулирования, теории гидравлических систем и систем теплоснабжения.

Источником экспериментальных данных явились результаты натурных испытаний автоматической системы регулирования режимами ПСП в системе теплоснабжения объектов ОАО "ММК", г. Магнитогорск.

Научная новизна диссертационной работы. В ходе исследования получены следующие результаты.

1. Построена новая имитационная модель процессов автоматического регулирования режимов ПСП, отражающая процессы возникновения автоколебаний и ударных воздействия в двухфазной среде пар-вода.

2. Разработана новая методика оптимизации геометрических параметров ПСП на основе имитационных и натурных экспериментов.

Практическое значение. В рамках диссертационной работы разработана система автоматического регулирования режимов ПСП, на основе которой создана экспериментальная установка автоматизации ПСП. Разработан проект автоматизации пароструйного подогревателя и на его основе осуществлено внедрение автоматизированного ПСП в паросиловом цехе ОАО "ММК". Применение системы автоматизации позволило:

- 1) устранить ударные воздействия и автоколебания в ПСП;
- 2) обеспечить заданную регулировочную характеристику;
- 3) в широком диапазоне изменения параметров обеспечить необходимую точность регулирования режимов ПСП в пределах $\pm 0,5$ °С.

В настоящее время составлен перспективный план внедрения автоматизированных ПСП в других цехах ОАО "ММК". Автоматизированные ПСП могут быть рекомендованы к внедрению и на других металлургических предприятиях.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы были доложены на XXXII Уральском семинаре по механике и процессам управления, г. Миасс, 24 декабря 2002г.; на девятой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика", г. Москва, 4 – 5 марта 2003г.

На защиту выносятся:

- 1) имитационная модель процесса регулирования режимов ПСП;
- 2) метод оптимизации параметров ПСП.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Проблемы обеспечения устойчивости и управляемости режимов пароструйного подогревателя

К струйным аппаратам относятся устройства, в которых осуществляется процесс инжекции, заключающийся в передаче кинетической энергии одного потока другому путем непосредственного смешения.

Струйные аппараты, в которых полностью изменяется агрегатное состояние одного из взаимодействующих потоков, причем рабочей средой является жидкость, а инжектируемой средой является пар, носят название пароводяные струйные подогреватели (ПСП).

В смешивающем струйном подогревателе можно выделить следующие элементы: активное (рабочее) сопло, камеру смешения, диффузор, входной участок камера смешения для пропуска пассивного потока, выполненный в виде конфузора. Рабочее коническое сопло установлено соосно (по центру) с камерой смешения

Обобщенная схема ПСП представлена на рис. 1.

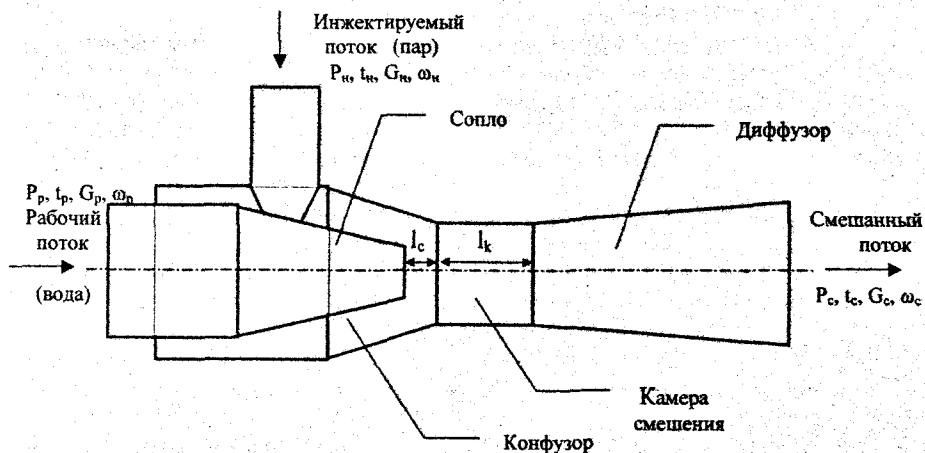


Рис. 1. Схема пароводяного струйного подогревателя

Процесс в ПСП с цилиндрической камерой смешения можно схематически представить следующим образом. Струя инжектируемого пара, при достаточной разности температур, конденсируется в рабочей жидкости до поступления в камеру смешения, повышая температуру воды и сообщая ей дополнительную скорость. При поступлении смеси в камеру смешения ограниченного сечения скорость смеси возрастает, а давление ее соответственно снижается.

После выравнивания полей давления и скоростей смешанный поток, обладающий еще большей скоростью, подается в диффузор, где происходит

преобразование кинетической энергии потока в потенциальную энергию давления.

Основным геометрическим параметром ПСП является расстояние среза сопла от камеры смешения l_c . При небольших значениях l_c сечение для прохождения пара уменьшается, скорость течения пара увеличивается, поверхность для конденсации пара на струе воды минимальная. При увеличении расстояния среза сопла от камеры смешения происходит вскипание воды. Поэтому важно правильно выбрать данный параметр для стабильной работы ПСП.

Устойчивость работы ПСП зависит от устойчивости поведения струи воды, исходящей из сужающегося сопла, на которой происходит процесс полной или частичной конденсации инжектируемого пара.

Схема струи представлена на рис. 2. Так при росте угла эжекции (α_3) снижается эффективная поверхность конденсации S_3 , пар не успевает конденсироваться, давление пара растет. При определенном давлении пара уменьшается угол эжекции струи. Вследствие инерции струи воды, угол эжекции будет увеличиваться, что приводит к колебаниям струи воды.

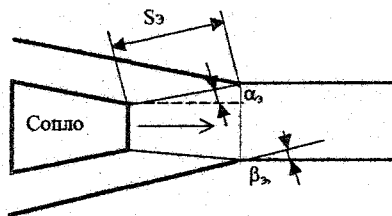


Рис. 2. Схема распространения струи в спутном потоке

Необходимо соблюдать рабочий режим ПСП, при котором происходит максимальная конденсация пара на струе воды с минимальными колебаниями. Вскипание воды в ПСП при $P_n \rightarrow \infty$ является критическим режимом работы, при котором возникают значительные возмущающие воздействия ($\alpha_3 \rightarrow 0$), которые приводят к разрушению струи. Одним из способов устранения возмущающих воздействий является охлаждение инжектируемого пара водой в блоке предварительного смешения перед ПСП¹. При $P_n \rightarrow 0$ угол эжекции $\alpha_3 \rightarrow 90^\circ$ и эффективная поверхность конденсации минимальна. Вследствие этого растет давление пара, что приводит к возникновению возмущающих воздействий. Захлебывание ПСП, при данной конструкции аппарата, не приводит к срыву его работы и является пусковым режимом работы.

¹ Недугов А.Ф., Куркулов М.А., Никифоров Г.В., Седельников С.В., Шевченко Г.В. Патент на способ подачи пара в водяную магистраль и устройство для его осуществления № 2198323, 21.06. 2000г.

Демпфировать колебания струи воды возможно изменением угла конфузора β , поэтому необходимо выбирать данный параметр исходя из стабильной работы ПСП.

Работа ПСП чувствительна к изменению параметров инжектируемого, рабочего и смешенного потоков. Поэтому необходимо исследовать влияние его параметров для обеспечения устойчивости и управляемости режимов работы ПСП.

При использовании ПСП для нужд теплоснабжения необходимо учесть следующее. При повышении (понижении) температуры наружного воздуха требуемая температура сетевой воды должна снижаться (повышаться) согласно температурному графику. А это означает, что расход пара подогревателя должен уменьшаться (увеличиваться). Поэтому необходимо управлять режимами ПСП для эффективного использования в системе теплофикации.

Имитационная модель процессов регулирования режимов пароструйного подогревателя

Имитационная модель создана на основе общих уравнений механики двухфазных сред, разработанных М.Е. Дейчем и Г.А. Филипповым. Для выявления условий приближенного моделирования двухфазных потоков следует рассмотреть простую модель течения, отвечающую следующим допущениям:

1. Рассматриваемая среда является смесью пара и жидких капель (частиц), равномерно распределенных в объеме паровой фазы;
2. Дискретная фаза является идеальным газом;
3. Взаимодействие частиц несущей (непрерывной) фазы между собой не учитывается;
4. При рассмотрении силового взаимодействия несущей и дискретной фаз учитываются только силы вязкости и силы, обусловленные продольными градиентами в потоке;
5. Температура в объеме частиц распределена равномерно;
6. Сжимаемостью жидкой фазы можно пренебречь.

Система дифференциальных уравнений одномерного течения является следствием общих уравнений механики двухфазных сред и для неустановившегося одномерного течения имеет следующий вид:

$$F \frac{\partial \rho_1 \varphi_1}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho_1 \varphi_1 c_1 F}{\partial z} = \chi F; \quad (1)$$

$$F \frac{\partial \rho_2 \varphi_2}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho_2 \varphi_2 c_2 F}{\partial z} = -\chi F; \quad (2)$$

$$\rho_1 \varphi_1 \frac{\partial c_1}{\partial \tau} + \rho_1 \varphi_1 c_1 \frac{\partial c_1}{\partial z} = -\chi(c_1 - c_2) - \frac{\partial \varphi_1 P}{\partial z} + R; \quad (3)$$

$$\rho_2 \varphi_2 \frac{\partial c_2}{\partial \tau} + \rho_2 \varphi_2 c_2 \frac{\partial c_2}{\partial z} = -\chi(c_2 - c_1) - \frac{\partial \varphi_2 P}{\partial z} - R; \quad (4)$$

$$\rho_1 \varphi_1 \left(\frac{\partial h_{01}}{\partial \tau} + c_1 \frac{\partial h_{01}}{\partial z} \right) = -\chi(h_{01} - h_{02}) - Q + N; \quad (5)$$

$$\rho_2 \varphi_2 \left(\frac{\partial h_{02}}{\partial \tau} + c_2 \frac{\partial h_{02}}{\partial z} \right) = -\chi (h_{03} - h_{02}) + Q - N; \quad (6)$$

Индекс 1 относится к непрерывной фазе, 2 – к дискретной, 3 – к частицам, претерпевшим фазовые превращения. ρ – плотность, кг/м³; c – скорость, м/с; φ – объемное содержание фазы, доля от единицы; F – площадь сечения канала, м²; τ – время, с; z – продольная координата, м; χ – скорость фазовых переходов, $h_0 = h + c^2/2$ – энтальпия торможения, Дж/кг; h – энтальпия движущейся фазы, Дж/кг; R – сила механического взаимодействия между фазами, Q – теплота, отдаваемая или воспринимаемая фазой в результате конвективного теплообмена в единицу времени, N – мощность сил взаимодействия фаз в градиентном потоке.

Начальные и граничные условия представлены в виде:

$$\frac{dF}{dz} = 2\pi \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{180 - \beta_{\text{кон}}}{180} \pi \right), \quad l_k > z;$$

$$\frac{dF}{dz} = 0, \quad l_k < z < l_k + l_{\text{кс}};$$

$$\frac{dF}{dz} = 2\pi \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\beta_{\text{диф}}}{180} \pi \right), \quad l_k + l_{\text{кс}} < z < l_k + l_{\text{кс}} + l_d;$$

$$\frac{dc_1(0,t)}{dz} = 0, \quad t > 0; \quad \frac{d\varphi_2(0,t)}{dz} = 0, \quad t > 0;$$

$$\frac{dP(0,t)}{dz} = 0, \quad t > 0; \quad \frac{dc_2(0,t)}{dz} = 0, \quad t > 0;$$

$$\frac{d\rho_2(0,t)}{dz} = 0, \quad t > 0; \quad \frac{dT_1(0,t)}{dz} = 0, \quad t > 0;$$

$$c_1(z,0) = c_{10}(z), \quad \varphi_2(z,0) = \varphi_{20}(z), \quad P(z,0) = P_0(z),$$

$$c_2(z,0) = c_{20}(z), \quad \rho_2(z,0) = \rho_{20}(z), \quad T_1(z,0) = T_{10}(z), \quad 0 \leq z \leq L.$$

где L – длина подогревателя, $\beta_{\text{кон}}$ – угол сужения конфузора, $\beta_{\text{диф}}$ – угол расширения диффузора.

Исследование системы уравнений (1 – 6) с распределенными параметрами на устойчивость позволило получить параметрические границы устойчивости.

Сложность термогидродинамических процессов в двухфазных потоках не дает возможность решения полной системы уравнений энергии, движения и неразрывности. Необходимо вводить в рассмотрение упрощающие допущения, эмпирические соотношения, выделяя в качестве основных те или иные физические механизмы.

Для упрощенной системы уравнений (1 – 6), составленных М.Е. Дейчем и Г.А. Филипповым, на первом этапе производится численное решение системы уравнений методом Рунге-Кутты для стационарного течения.

На втором этапе моделирования процессов, происходящих в пароводяном подогревателе, производится численное решение преобразованной системы уравнений (1 – 6) методом частичной дискретизации для нестационарного течения с помощью пакета MATLAB 5.0.

На третьем этапе моделирования производится анализ линеаризованной нестационарной системы уравнений. При линеаризации используются полученные решения уравнений для стационарного течения. Структура линеаризованной модели приведена далее, см. (8). Полное описание модели дано в пояснительной записке к диссертационной работе.

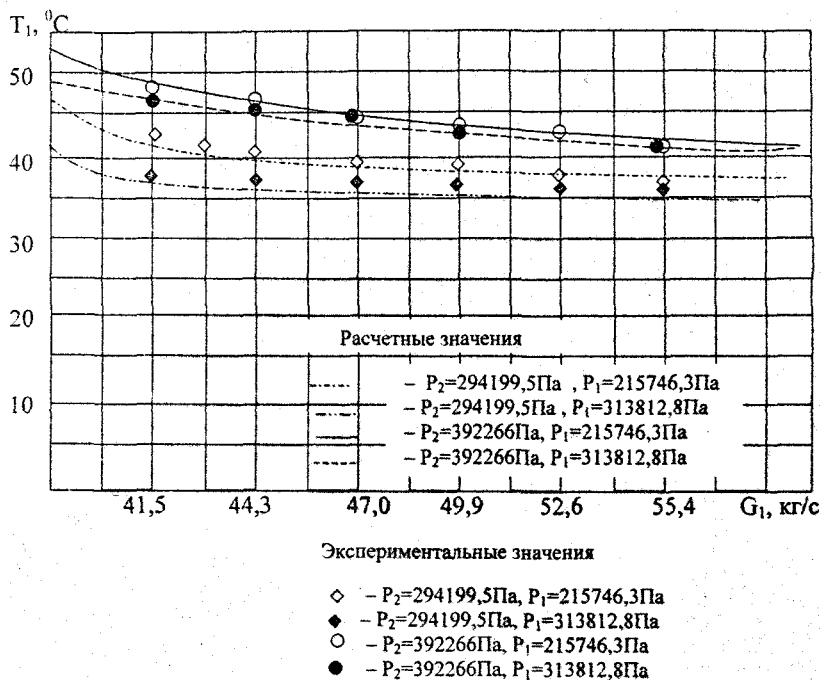


Рис. 3. Зависимость температуры воды на выходе ПСП от расхода воды

Оптимизация параметров пароструйного подогревателя

Для ПСП температура воды после аппарата является предпочтительным критерием оптимизации, так как необходимо при заданных начальных условиях и геометрических параметрах ПСП получать максимально возможную температуру воды на выходе при поддержании стабильной работы ПСП.

Для оптимизации геометрических параметров ПСП используется метод планирования эксперимента. Метод основан на наблюдении реакции системы на изменения основных факторов, влияющих на работу ПСП.

Основным геометрическим параметром ПСП является расстояние среза сопла от камеры смешения l_c . Этот параметр определяет поверхность конденсации пара на струе воды. Оптимальный выбор расстояния среза сопла от

камеры смещения в зависимости от начальных параметров системы позволяет исключить возможности развития возмущающих воздействий в ПСП.

Другим основным параметром является соотношение сечений камеры смещения и сеченe выходного среза сопла f_3 / f_{p1} . Третий параметр, который изменяется в ходе эксперимента, является угол конфузора β .

Данные три фактора позволяют провести полный факторный эксперимент (ПФЭ) 3^{го} порядка. В эксперименте используются две цилиндрические камеры смещения с различными диаметрами d_{max} и d_{min} ; два сменных сужающихся сопла с максимальным выходным сечением f_{p1max} и минимальным выходным сечением f_{p1min} , установленных на расстояниях l_{cmax} и l_{cmin} ; два конфузора с различными углами сужения β_{max} и β_{min} .

Фактор ξ_1 принимает значения +1, если в данном эксперименте используется конфузор с максимальным значением β_{max} , и -1, если используется конфузор с β_{min} . Фактор ξ_2 равен +1 при использовании максимального параметра l_{cmax} , и равен -1 при использовании l_{cmin} . Фактор ξ_3 характеризует отношение сечений f_3/f_{p1} . $\xi_3=+1$ при использовании в эксперименте камеры смещения максимального диаметра и сопла с наименьшим диаметром выходного сечения сопла, и наоборот.

В таблице 1 представлены уровни и интервалы варьирования факторов.

Таблица 1

Уровни факторов	ξ_1 , град	ξ_2 , м	ξ_3 , м
Базовый уровень	24,24	0,07	0,09
Интервал варьирования	5	0,01	0,01
Верхний уровень	29,25	0,08	0,1
Нижний уровень	19,24	0,06	0,08

На базе паросилового цеха ОАО «ММК» был спланирован и проведен ПФЭ для исследования влияния изменения основных геометрических размеров ПСП на работу аппарата.

Одной из важных проблем экспериментального исследования двухфазного течения является подбор измерительных приборов и методики измерения. Комплекс измерительных приборов для двухфазного течения включает приборы измерения давления и температур паровой и жидкой фаз. Схема размещения приборов представлена на рис. 4.

При постоянных величинах входных переменных пара и воды получены отклики системы на изменения геометрических параметров пароводяного струйного подогревателя: $P_1=215746,3\text{Па}$ (2,2 ат) – начальное давление воды перед ПСП, $P_2=490332,5\text{Па}$ (5,0 ат) – начальное давление пара перед ПСП, $G_1=47,2\text{ кг/с}$ – расход воды, $T_1=20,0^\circ\text{C}$ – начальная температура воды, $T_2=170,0^\circ\text{C}$ – начальная температура пара.

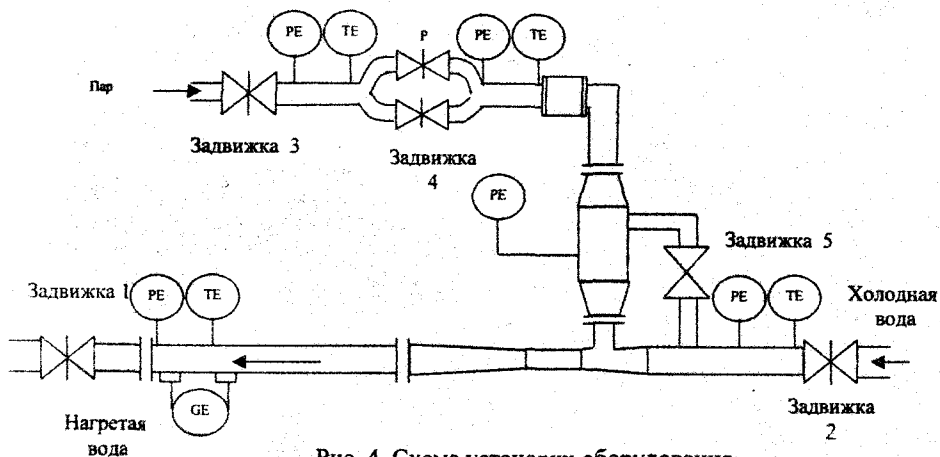


Рис. 4. Схема установки оборудования

В таблице 2 представлены результаты опытов, при проходном сечении регулирующего вентиля 100%.

Таблица 2

Матрица планирования ПФЭ 3^{го} порядка

Номер опыта	Порядок проведения опытов	Факторы				Реакция $T_1, ^\circ\text{C}$
		ξ_0	ξ_1	ξ_2	ξ_3	
1	7	+1	+1	+1	+1	40,6
2	2	+1	-1	+1	+1	41,4
3	8	+1	+1	-1	+1	39,1
4	3	+1	-1	-1	+1	38,3
5	1	+1	+1	+1	-1	40,6
6	4	+1	-1	+1	-1	41,5
7	5	+1	+1	-1	-1	41,4
8	6	+1	-1	-1	-1	38,3

Таким образом, была получена зависимость температуры воды от геометрических размеров подогревателя при условии стабильной работы подогревателя.

$$y = 40,19 + 0,3205 \xi_1 + 0,83 \xi_2 - 0,316 \xi_3 \quad (7)$$

В таблицах 3 и 4 представлены реакции системы при проведении опытов для нахождения оптимальных геометрических параметров ПСП с учетом полученной линейной зависимости (7) методом кругого восхождения.

Таблица 3

Уровни и интервалы варьирования

Наименование	Факторы		
	ξ_1	ξ_2	ξ_3
Базовый уровень	24,24	0,07	0,09
Коэффициент b_i	0,3205	0,83	-0,316
Интервал варьирования	5	0,01	0,01
$b_i \times \xi_i$	1,6025	0,0083	-0,00316
Шаг Δ_i	0,5	0,0026	-0,00099
Округленный шаг	0,5	0,003	-0,001

Таблица 4

Расчет кругого восхождения

Наименование	Факторы			Реакция У
	ξ_1	ξ_2	ξ_3	
Опыт 1	24,74	0,073	0,089	41,5
Опыт 2	25,24	0,076	0,088	41,5
Опыт 3	25,74	0,079	0,087	41,6
Опыт 4	26,24	0,082	0,086	41,1
Опыт 5	26,74	0,085	0,085	40,9

Лучший результат получен в третьем опыте. Температура воды на выходе ПСП 41,6°C. Таким образом потребовалось 3 опыта, чтобы определить оптимальные параметры работы ПСП.

В результате проведения ПФЭ получены основные геометрические размеры ПСП, которые обеспечивают стабильную работу подогревателя, при максимальной температуре теплоносителя на выходе ПСП.

Экспериментальная регулировочная кривая

В данной работе проводились испытания ПСП Ду200 перед внедрением системы автоматического регулирования для определения рабочих режимов работы ПСП и определения влияния входных параметров пара и воды на работу подогревателя.

При проведении экспериментального исследования ПСП была получена зависимость температуры воды на выходе от давления пара на входе ПСП (рис. 5). Данная зависимость показывает, что регулировочная характеристика почти линейная, а ПСП обеспечивает стабильную работу при изменении входных параметров в рабочем режиме подогревателя, что делает возможным создание автоматической системы регулирования температуры нагреваемой воды на базе ПСП.

В таблице 4 представлены экспериментальные данные испытаний ПСП. Схема установки, график изменения давления водяного тракта и места установки контрольных приборов приведены на рис. 4.

Экспериментальная параметрическая область устойчивости ПСП имеет вид представленный на рис. 6. Область устойчивости находится ниже поверхности устойчивости. Исходя из экспериментальных исследований, получен рабочий режим ПСП: давление пара на входе ПСП 294199,5 ... 490332,5 Па (3 ... 5 ат), давление воды на входе ПСП 215746,3 ... 313812,8 Па (2.2 ... 3.2 ат), расход воды 41,55 ... 55,4 кг/с (150 ... 200 т/ч).

Таблица 4

Экспериментальные данные испытаний ПСП

№	$P_{п},$ $\times 98066,5$ Па	$T_1,$ $^{\circ}\text{C}$	$T_2,$ $^{\circ}\text{C}$	$P_1,$ $\times 98066,5$ Па	$P_2,$ $\times 98066,5$ Па	$P_3,$ $\times 98066,5$ Па	$G,$ $\times 0,277$ кг/с	Вибрации
1	-	11	11	2,3	1,3	1,2	170	Нет
2	0-1,8	11	14					Есть
3	4,5	11	28	1,7	~1,1	~1,8	200	Нет
4	6,4	11	48	1,3	~1,1	~3,0	211	Нет
5	6,8	11	51	1,2	~1,1	~3,0	211	Нет
6	6,8	11	44	2,0	~1,1	~2,8	271	Нет
7	5,0	11	44	1,2	1,0	2,5	195	Нет
8	5,0	11	46	1,0	1,1	2,5	187	Нет
9	5,0	11	52	0,9	1,0	2,5	160	Нет
10	4,5	11	50	1,0	1,0	2,3	160	Нет
11	4,0	11	47	1,0	1,0	2,0	155	Нет
12	3,5	11	45	1,0	1,0	1,9	153	Нет
13	3,0	11	41	1,1	1,0	1,8	153	Нет
14	2,5	11	38	1,2	1,0	1,6	151	Нет

Обозначения параметров в таблице: P_n – давление пара на паровом входе ПСП, Па; P_1 – давление воды на водяном входе ПСП, Па; P_2 – давление нагретой воды на выходе ПСП, Па; P_3 – давление в камере предварительного смешивания, Па; T_1 – температура воды на входе ПСП, °C; T_2 – температура нагретой воды на выходе, °C; G – расход воды на вводе ПСП, кг/с.

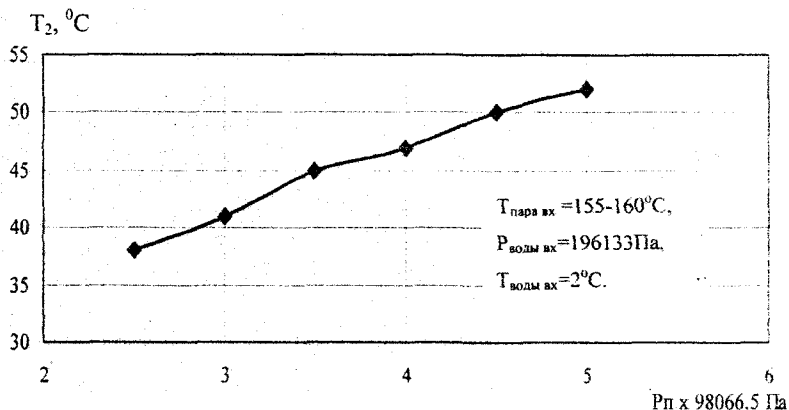


Рис. 5. Экспериментальная регулировочная характеристика ПСП
 T_2 – температура воды на выходе, P_n – давление пара на входе

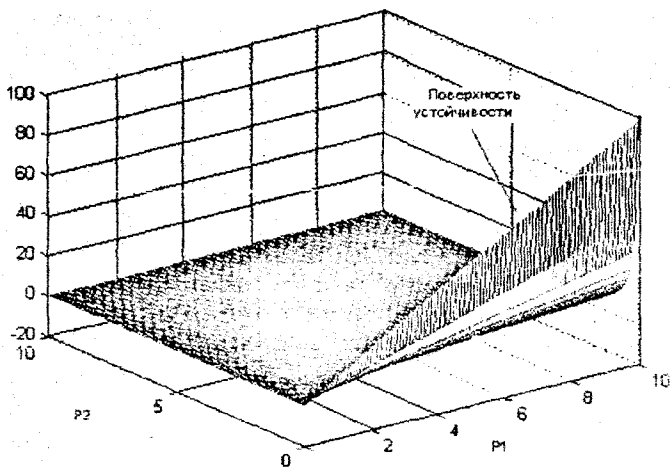


Рис. 6. Параметрическая экспериментальная граница устойчивости
 $P_1, \times 98066,5 \text{ Па}$ – давление воды на входе ПСП.
 $P_2, \times 98066,5 \text{ Па}$ – давление пара в предварительной камере смешения ПСП

Структура системы автоматического регулирования

Для регулирования температуры на выходе ПСП предложена система автоматического регулирования ПСП (рис. 7).

Система автоматического регулирования включает в себя:

- пароструйный подогреватель,
- цифровые датчики температуры воды на входе и выходе,
- показывающий термометр, установленный на подводящем паропроводе,
- манометры, для измерения давления воды и пара на входе и выходе подогревателя,
- регулирующий клапан с электроприводом, расположенным на подводящем паропроводе,
- микропроцессорный контроллер.

Система автоматического регулирования предназначена для поддержания требуемой температуры нагреваемой воды на выходе подогревателя путем изменения количества пара, поступающего в ПСП.

Для того чтобы не допустить распада струи и задать необходимый режим работы в ПСП, необходимо управлять параметрами пара. Параметры пара изменяются регулирующим клапаном с электроприводом на подводящем паропроводе. Электропривод в свою очередь управляется микропроцессорным контроллером. В зависимости от температуры на выходе, давлений пара и воды на входе ПСП и в зависимости от требуемого температурного режима подогревателя микропроцессорный контроллер выдает управляющие воздействия на закрытие или открытие регулирующего клапана. Алгоритм регулирования температуры воды на выходе ПСП представлен на рис. 8.

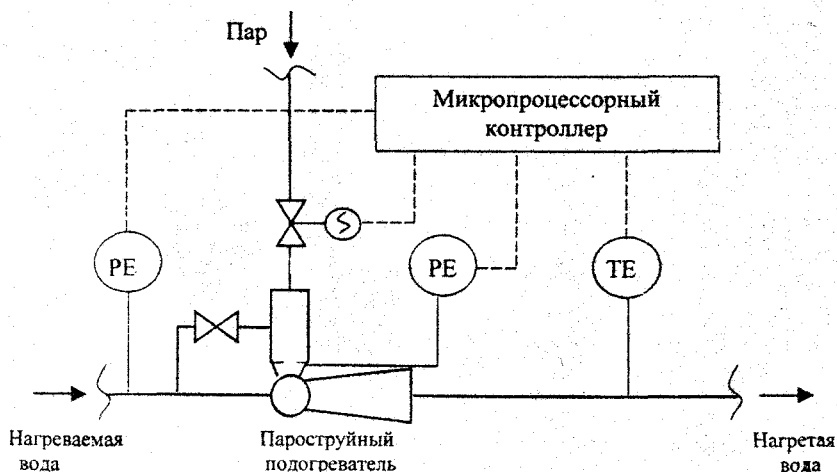


Рис. 7. Схема автоматического регулирования режимов пароструйного подогревателя

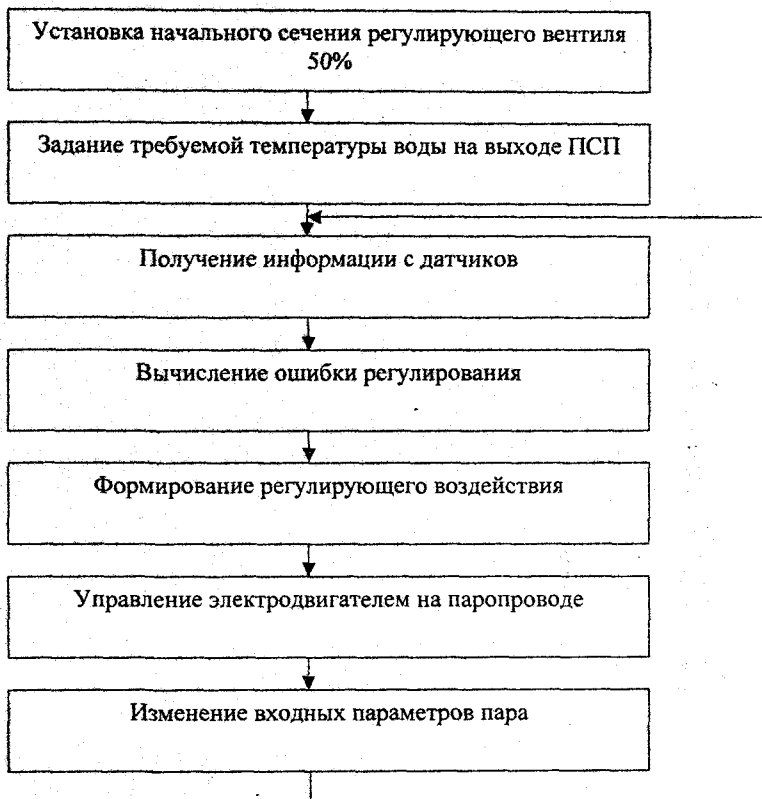


Рис. 8. Алгоритм регулирования температуры воды на выходе ПСП

Данная схема автоматизированной системы регулирования режимов пароструйного подогревателя внедрена на ОАО "ММК" в паросиловом цехе.

Синтез оптимального управления процессами ПСП

Формирование регулирующих воздействий на ПСП целесообразно осуществлять на основе использования методов оптимального управления. Для решения данной задачи в работе использовался принцип максимума Понтрягина.

В нормальной форме записи процессы ПСП имеют вид:

$$\dot{\mu}(t) = A \cdot \mu(t) + B \cdot u(t),$$

$$\mu(t_0) = \mu_0,$$

$$y(t) = C\mu(t),$$

где μ – n -мерный вектор состояния; u – g -мерный вектор управления, $u \in R^g$; t – время; y – k -мерный вектор выхода; A, B, C – матрицы размера $n \times n$, $n \times g$, $k \times n$ соответственно, μ_0 – начальное состояние.

Модель ПСП, как объекта регулирования, описывается следующими уравнениями:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mu}_1(1)[t] \\ \dot{\mu}_1(2)[t] \\ \dots \\ \dot{\mu}_1(n-1)[t] \\ \dot{\mu}_1(n)[t] \\ \dot{\mu}_2(1)[t] \\ \dot{\mu}_2(2)[t] \\ \dots \\ \dot{\mu}_2(n-1)[t] \\ \dot{\mu}_2(n)[t] \\ \dot{\mu}_3(1)[t] \\ \dot{\mu}_3(2)[t] \\ \dots \\ \dot{\mu}_3(n-1)[t] \\ \dot{\mu}_3(n)[t] \\ \dot{\mu}_4(1)[t] \\ \dot{\mu}_4(2)[t] \\ \dots \\ \dot{\mu}_4(n-1)[t] \\ \dot{\mu}_4(n)[t] \\ \dot{\mu}_5(1)[t] \\ \dot{\mu}_5(2)[t] \\ \dots \\ \dot{\mu}_5(n-1)[t] \\ \dot{\mu}_5(n)[t] \\ \dot{\mu}_6(1)[t] \\ \dot{\mu}_6(2)[t] \\ \dots \\ \dot{\mu}_6(n-1)[t] \\ \dot{\mu}_6(n)[t] \end{bmatrix} = [A] \times \begin{bmatrix} \mu_1(1)[t] \\ \mu_1(2)[t] \\ \dots \\ \mu_1(n-1)[t] \\ \mu_1(n)[t] \\ \mu_2(1)[t] \\ \mu_2(2)[t] \\ \dots \\ \mu_2(n-1)[t] \\ \mu_2(n)[t] \\ \mu_3(1)[t] \\ \mu_3(2)[t] \\ \dots \\ \mu_3(n-1)[t] \\ \mu_3(n)[t] \\ \mu_4(1)[t] \\ \mu_4(2)[t] \\ \dots \\ \mu_4(n-1)[t] \\ \mu_4(n)[t] \\ \mu_5(1)[t] \\ \mu_5(2)[t] \\ \dots \\ \mu_5(n-1)[t] \\ \mu_5(n)[t] \\ \mu_6(1)[t] \\ \mu_6(2)[t] \\ \dots \\ \mu_6(n-1)[t] \\ \mu_6(n)[t] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ S_2(n) \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ S_{4,7}(1) \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ S_5(1) \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ S_6(1) \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times u[t] \quad (8)$$

$S_{1,2}(1) S_{3,1}(1) \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{1,4}(1) S_{1,3}(1) \ \dots \ 0 \ S_{1,6}(1) S_{1,5}(1) \ \dots \ 0 \ S_{1,8}(1) S_{1,7}(1) \ \dots \ 0 \ S_{1,10}(1) S_{1,9}(1) \ \dots \ 0 \ S_{1,12}(1) \ \dots \ 0$
 $0 \ S_{1,2}(2) S_{1,1}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ S_{1,4}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{1,6}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{1,8}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{1,10}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ \dots \ 0$
.....
 $0 \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{1,2}(n) S_{1,1}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{1,3}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{1,5}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{1,7}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{1,9}(n) \ 0 \ \dots \ S_{1,11}(n)$
 $S_{2,2}(1) S_{2,1}(1) \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{2,4}(1) S_{2,3}(1) \ \dots \ 0 \ S_{2,6}(1) S_{2,5}(1) \ \dots \ 0 \ S_{2,8}(1) S_{2,7}(1) \ \dots \ 0 \ S_{2,10}(1) S_{2,9}(1) \ \dots \ 0 \ S_{2,12}(1) \ \dots \ 0$
 $0 \ S_{2,2}(2) S_{2,1}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ S_{2,4}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{2,6}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{2,8}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{2,10}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ \dots \ 0$
.....
 $0 \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{2,2}(n) S_{2,1}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{2,3}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{2,5}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{2,7}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{2,9}(n) \ 0 \ \dots \ S_{2,11}(n)$
 $S_{3,2}(1) S_{3,1}(1) \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{3,4}(1) S_{3,3}(1) \ \dots \ 0 \ S_{3,6}(1) S_{3,5}(1) \ \dots \ 0 \ S_{3,8}(1) S_{3,7}(1) \ \dots \ 0 \ S_{3,10}(1) S_{3,9}(1) \ \dots \ 0 \ S_{3,12}(1) \ \dots \ 0$
 $0 \ S_{3,2}(2) S_{3,1}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ S_{3,4}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{3,6}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{3,8}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{3,10}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ \dots \ 0$
.....
 $0 \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{3,2}(n) S_{3,1}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{3,3}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{3,5}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{3,7}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{3,9}(n) \ 0 \ \dots \ S_{3,11}(n)$
 $S_{4,2}(1) S_{4,1}(1) \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{4,4}(1) S_{4,3}(1) \ \dots \ 0 \ S_{4,6}(1) S_{4,5}(1) \ \dots \ 0 \ S_{4,8}(1) S_{4,7}(1) \ \dots \ 0 \ S_{4,10}(1) S_{4,9}(1) \ \dots \ 0 \ S_{4,12}(1) \ \dots \ 0$
 $0 \ S_{4,2}(2) S_{4,1}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ S_{4,4}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{4,6}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{4,8}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{4,10}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ \dots \ 0$
.....
 $0 \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{4,2}(n) S_{4,1}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{4,3}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{4,5}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{4,7}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{4,9}(n) \ 0 \ \dots \ S_{4,11}(n)$
 $S_{5,2}(1) S_{5,1}(1) \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{5,4}(1) S_{5,3}(1) \ \dots \ 0 \ S_{5,6}(1) S_{5,5}(1) \ \dots \ 0 \ S_{5,8}(1) S_{5,7}(1) \ \dots \ 0 \ S_{5,10}(1) S_{5,9}(1) \ \dots \ 0 \ S_{5,12}(1) \ \dots \ 0$
 $0 \ S_{5,2}(2) S_{5,1}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ S_{5,4}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{5,6}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{5,8}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{5,10}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ \dots \ 0$
.....
 $0 \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{5,2}(n) S_{5,1}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{5,3}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{5,5}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{5,7}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{5,9}(n) \ 0 \ \dots \ S_{5,11}(n)$
 $S_{6,2}(1) S_{6,1}(1) \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{6,4}(1) S_{6,3}(1) \ \dots \ 0 \ S_{6,6}(1) S_{6,5}(1) \ \dots \ 0 \ S_{6,8}(1) S_{6,7}(1) \ \dots \ 0 \ S_{6,10}(1) S_{6,9}(1) \ \dots \ 0 \ S_{6,12}(1) \ \dots \ 0$
 $0 \ S_{6,2}(2) S_{6,1}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ S_{6,4}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{6,6}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{6,8}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ S_{6,10}(2) \ \dots \ 0 \ 0 \ \dots \ 0$
.....
 $0 \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{6,2}(n) S_{6,1}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{6,3}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{6,5}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{6,7}(n) \ 0 \ 0 \ \dots \ S_{6,9}(n) \ 0 \ \dots \ S_{6,11}(n)$

где коэффициенты $S_{n,g}(i)$ в матрице $A(9)$ вычисляются для каждого шага моделирования по пространственной координате по данным установившегося стационарного течения двухфазной жидкости в ЛСП.

Целевой функционал задан как интегральный квадратичный критерий качества процесса.

$$I_{\text{ка}} = \int_0^{\infty} h^2(t) dt = \int (T_1 - \mu_2)^2 dt \rightarrow \min.$$

Применяя принцип максимума Понтрягина для модели ЛСП, составлен гамильтониан вида:

$$H(t, \psi, \mu, u) = -f_0 + \psi_1(a_{1,1}\mu_1 + a_{2,1}\mu_2 + \dots + a_{6n,1}\mu_{6n} + b_1 u) + \dots + \psi_{6n}(a_{1,6n}\mu_1 + a_{2,6n}\mu_2 + \dots + a_{6n,6n}\mu_{6n} + b_{6n} u).$$

Структура оптимального управления $u^*(t) = u^*(t, \psi(t), \mu(t))$ находится из условия максимума гамильтониана по управлению.

$$\frac{\partial}{\partial u} H(t, \psi, \mu, u) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial u} H(t, \psi, \mu, u) = (\psi_{2n} b_{2n} + \psi_{3n+1} b_{3n+1} + \psi_{4n+1} b_{4n+1} + \psi_{5n+1} b_{5n+1}).$$

Отсюда

$$u^*(t) = 1 \operatorname{sign}(\psi_{2n} b_{2n} + \psi_{3n+1} b_{3n+1} + \psi_{4n+1} b_{4n+1} + \psi_{5n+1} b_{5n+1}).$$

Вспомогательная система для нахождения ψ_i имеет вид:

$$\dot{\psi}_i(t) = -\frac{\partial}{\partial \mu_i} H(t, \psi(t), \mu(t), u(t)),$$

$$\dot{\psi}_{2n} = -\frac{\partial H(t, \psi(t), \mu(t), u(t))}{\partial \mu_{2n}} = -\psi_{2n} S_{2,3} + 2\mu_{2n} - 2T_3,$$

$$\dot{\psi}_{3n+1} = -\frac{\partial H(t, \psi(t), \mu(t), u(t))}{\partial \mu_{3n+1}} = -\psi_{3n+1} S_{4,8},$$

$$\dot{\psi}_{4n+1} = -\frac{\partial H(t, \psi(t), \mu(t), u(t))}{\partial \mu_{4n+1}} = -\psi_{4n+1} S_{5,10},$$

$$\dot{\psi}_{5n+1} = -\frac{\partial H(t, \psi(t), \mu(t), u(t))}{\partial \mu_{5n+1}} = -\psi_{5n+1} S_{6,12}.$$

Решая данную систему, получаем оптимальное управление

$$u^*(t) = \operatorname{sign}(b_{2n}(e^{1-S_{2,3}t} + 2\mu_{2n} \frac{1}{S_{2,3}} - 2T_3 \frac{1}{S_{2,3}}) + b_{3n+1} e^{1-S_{4,8}t} + b_{4n+1} e^{1-S_{5,10}t} + b_{5n+1} e^{1-S_{6,12}t}).$$

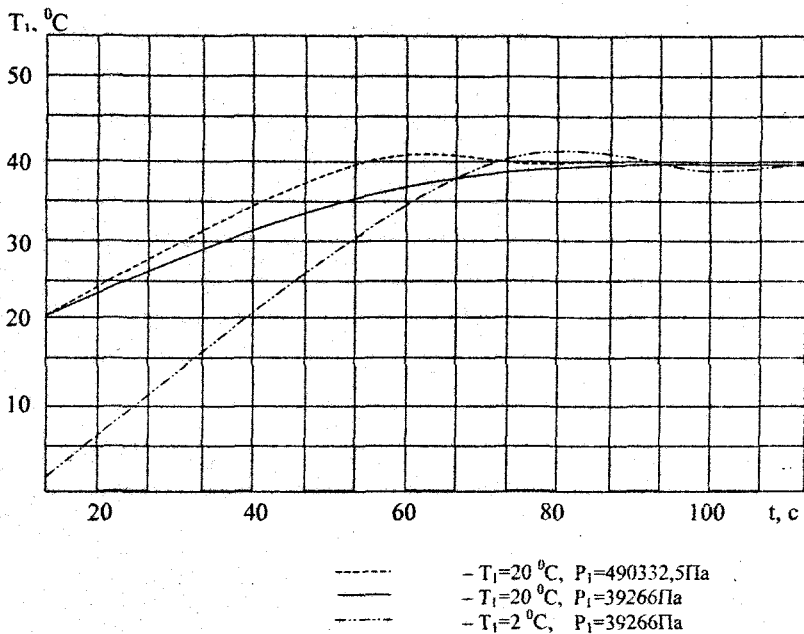


Рис. 8. Результаты имитационного моделирования с оптимальным управлением ($T_{\text{зад. ния}}=40^\circ\text{C}$)

На рис. 8. представлены результаты имитационного моделирования с использованием полученного оптимального управления.

Оценка качества регулирования процессов пароводяного струйного подогревателя по кривой переходного процесса системы регулирования показала, что предложенная система регулирования процессов пароводяного струйного подогревателя устойчивая и удовлетворяет всем поставленным требованиям к точности регулирования.

Экспериментальные исследования предложенной системы автоматического регулирования показали ее высокую эффективность. Автоматизированный ПСП обеспечивает регулирование температуры воды теплоносителя с требуемой точность $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Анализ опубликованных материалов показал, что использование ПСП является перспективным направлением работ по энергосбережению в теплофикационных системах, однако проблемы связанные с устойчивостью режимов функциональных процессов ПСП, возможностью возникновения ударных воздействий, низкой устойчивостью процессов в двухфазных средах ограничивают их, внедрение. Применение систем автоматического регулирования призвано решить указанные проблемы и повысить эффективность функционирования ПСП.

2. В работе предложена имитационная модель процессов регулирования режимов ПСП, учитывающая особенности течения двухфазных сред и позволяющая исследовать устойчивость и качество регулирования процессов ПСП.

3. Оптимизация геометрических размеров ПСП, обеспечивающая его максимальную эффективность, осуществлена на основе факторного эксперимента. Использование методов планирования эксперимента в работе позволило оптимизировать геометрические параметры: расстояние среза сопла от камеры смешения, сечение выходного среза сопла и угла конфузора.

4. Предложена система автоматического регулирования режимов ПСП, основанная на регулировании параметров пара на входе ПСП. В работе решена задача оптимальной настройки системы автоматического регулирования с использованием принципа максимума Понтрягина. Экспериментальные исследования предложенной системы автоматического регулирования показали ее высокую эффективность.

5. Внедрение автоматизированного ПСП на ОАО "ММК" показало, что ПСП устойчив в широком диапазоне изменения входных параметров и обеспечивает регулирование температуры воды с требуемой точностью $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Внедренная система автоматического регулирования режимов ПСП позволяет экономить топливно-энергетические ресурсы за счет утилизации отработанного в производстве пара.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих печатных работах:

1. Барбасова Т.А. О паровых инжекторах// Автоматизация и управление в технических системах: Тем. сб. науч. тр. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2000. – С. 24 – 26

2. Барбасова Т.А. Моделирование и расчетное исследование двухфазных потоков// Автоматизация и управление в технических системах: Тем. сб. науч. тр. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2003. – С. 66 – 70.

3. Шнайдер Д.А., Барбасова Т.А. Автоматическая система регулирования режимов струйного подогревателя// Механика и процессы управления. Труды